

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Kompenzátor objemu jaderné elektrárny MIR 1200

Pressurizer of Nuclear Power Plant MIR 1200

Student: Josef Šrahůlek
Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Josef Šrahůlek**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3907R004 Provoz a řízení v energetice**
Téma: **Kompensátor objemu jaderné elektrárny MIR 1200**
Pressurizer of Nuclear Power Plant MIR 1200

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerše literatury popište koncepci kompenzace objemu v jaderných elektrárnách tlakovodního typu a zejména pro jadernou elektrárnu MIR 1200 III+ generace. Proved'te rozbor vybraných provozních režimů podle simulátoru jaderné elektrárny.

Proved'te návrh výpočtu pro čtyřsmyčkové uspořádání primárního okruhu. Navrhněte základní charakteristiky svislých elektroohříváčů a sprchového systému.

Tepelný výkon jaderné elektrárny	3200 MWt
Tlak syté páry	7,00 MPa
Teplota chladiva v I. okruhu	298,2/328,9 °C
Tlak v I. okruhu	16,2 MPa
Parní výkon PG	1 602 t/hod
Teplota napájecí vody	225 °C

Seznam doporučené odborné literatury:

Radko Hejzlar : Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X

Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.

František Hezoučský: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

.....

Jméno a příjmení autora práce:

Josef Šrahůlek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Kněždub 309

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ŠRAHŮLEK, J. *Kompenzátor objemu jaderné elektrárny MIR 1200: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 38 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Bakalářská práce se zabývá koncepcí kompenzace objemu v jaderných elektrárnách tlakovodního typu. V úvodu jsou srovnány způsoby kompenzace objemu a rozbor provozních režimů jaderné elektrárny. Kompenzátor objemu je tlaková nádoba, která slouží ke kompenzaci objemu vody při nárůstu resp. poklesu teploty vody v primárním okruhu. Na základě vstupních údajů je navržen ohřívací a sprchový systém, sloužící k regulaci tlaku v primárním okruhu. V další části bakalářské práce je proveden návrh základních charakteristik pro navržený ohřívací a sprchový systém. Návrh charakteristik byl proveden s ohledem na bezpečnost provozu ve všech režimech jaderné elektrárny.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

ŠRAHŮLEK, J. *Pressurizer of Nuclear Power Plant MIR 1200: Bachelor thesis.* Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2011, 38 p. Thesis head: Kolat, P.

The Bachelor thesis deals with the concept of compensation the volume of pressurized water type nuclear power plants. In the opening are compared the ways of compensating for the volume and analysis of nuclear power operating modes. The pressurizer is pressure vessel, which used to compensate for the increased the volume water respectively decrease temperature of water in the primary circuit. On the basis of input data is designed shower and heating system used to regulate the pressure in the primary circuit. In the next part of the bachelor thesis is done design of the basic characteristics for the proposed by heating and shower system. Design characteristics were performed with respect to safety of operation in all modes of nuclear power plants.

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

d	$[m]$	průměr
h	$[m]$	stoupání spirály
i	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	entalpie
I	$[A]$	proud
L	$[m]$	charakteristický rozměr
m	$[kg]$	hmotnost
\dot{m}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok
n	$[-]$	počet prvků
p	$[MPa]$	tlak
P	$[kW]$	tepelný výkon
q	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota tepelného toku
Q	$[W]$	tepelný tok
R_o	$[\Omega \cdot mm^2 \cdot mm^{-1}]$	měrný odpor
R	$[\Omega]$	odpor
S_I	$[m^2]$	plocha stěn nad hladinou
S_{II}	$[m^2]$	plocha hladiny
T	$[^{\circ}C]$	teplota
T_s	$[^{\circ}C]$	střední teplota stěny
U	$[V]$	úbytek napětí
v	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$	měrný objem
V	$[m^3]$	objem
α	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
Δ	-	diference
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
π	-	Ludolfovo číslo

Indexy a symboly

d	dovolená hodnota
e	hodnota elektroohřívače
h	hladina
ch	kondenzát na sprch. kapkách
j	jmenovitá hodnota
k	kondenzát ze stěn
o	hodnota ohřívače
stř	střední
s	sprchy
1	voda
2	pára
I	pára – stěna
II	pára – voda
III	voda – stěna
''	syta pára
'	voda na mezi sytosti

OBSAH

1. ÚVOD.....	9
1.1 Význam a poslání energetiky	10
1.2 Podstata jaderné energetiky	12
1.3 Projekt MIR 1200	13
2. SYSTÉM KOMPENZACE OBJEMU CHLADIVA REAKTORU	15
3. KOMPENZÁTORY OBJEMU	16
3.1 Kompenzátory objemu s plynovým polštářem	16
3.2 Kompenzátory objemu s parním polštářem.....	20
4. VÝPOČET SPRCHOVÉHO A OHŘÍVACÍHO SYSTÉMU	23
4.1 Sprchový systém.....	23
4.2 Ohřívací systém.....	26
5. NÁVRH SVISLÝCH TRUBKOVÝCH ELEKTROOHŘÍVAČŮ (TEO)	28
6. PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY	33
6.1 Charakteristika pojistného systému.....	34
6.2 Charakteristika sprchového systému	35
6.3 Charakteristika ohřívacího systému	36
7. ZÁVĚR	37
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	38

1. ÚVOD

Mnozí z nás se určitě někdy zamysleli nad tím, jak svět bude vypadat v okamžiku, kdy dojde k vyčerpání všech dostupných zdrojů fosilních paliv a jestli budeme na tento okamžik dostatečně připraveni. Jistě mi dá každý zapravdu, že bez zdrojů energie se neobejdeme, proto se jaderná energetika jeví jako nezbytnou společenskou nutností.

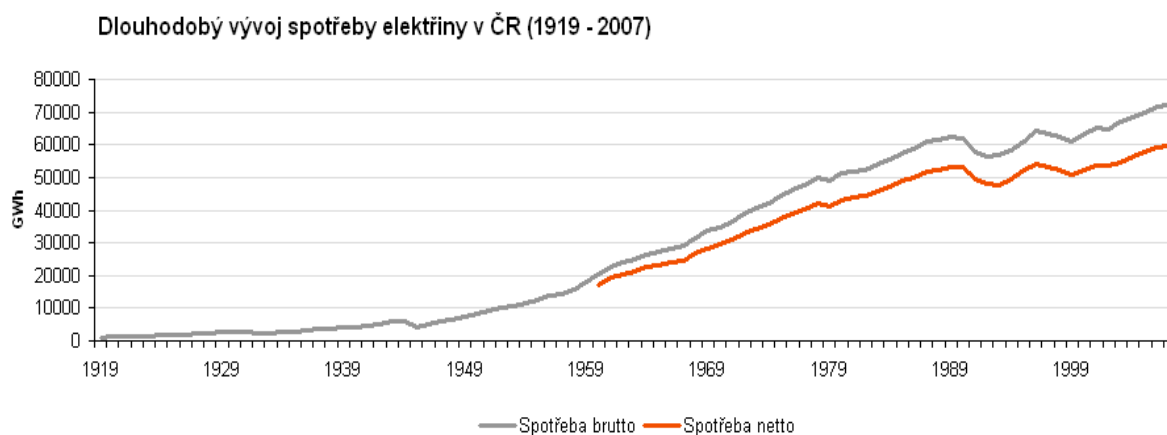
Jaderná energetika v uplynulých letech zažila významný vědeckotechnický rozvoj a do budoucna se počítá s tím, že se bude stále více podílet na výrobě energie. Na základě těchto skutečností směřovala má volba bakalářské práce právě k jaderné energetice.

Cílem této bakalářské práce je objasnění hlavního významu jaderné energetiky a popis koncepce kompenzace objemu v jaderných elektrárnách tlakovodního typu a to zejména pro jadernou elektrárnu MIR 1200. Dle simulátoru jaderné elektrárny jsou popsány provozní režimy. Další část bakalářské práce se zabývá návrhem a výpočtem základních charakteristik svislých elektroohříváčů a sprchového systému pro čtyřsmýčkové uspořádání primárního okruhu. V tomto čtyřsmýčkovém primárním okruhu se nachází jeden kompenzátor objemu trvale připojený k horké větvi s danými provozními parametry, pro které jsou provedeny všechny návrhy této práce.

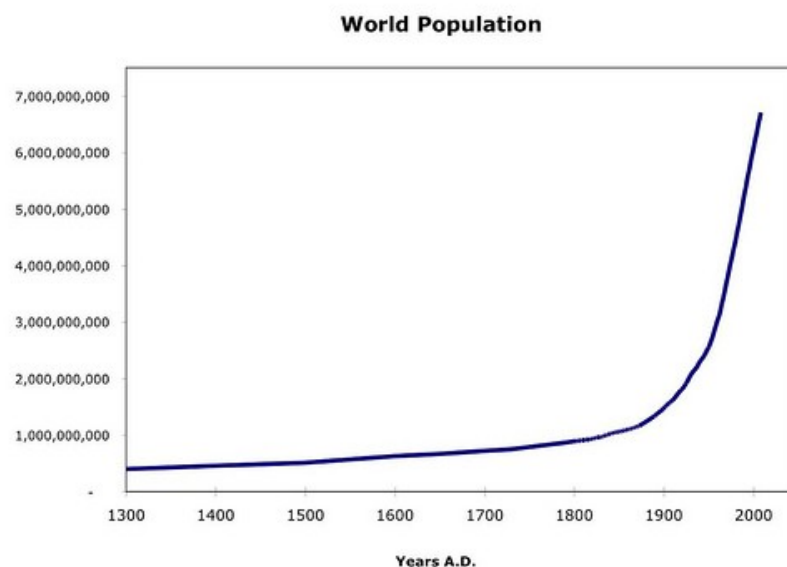
1.1 Význam a poslání energetiky

V dnešní době si málo kdo dokáže představit život bez elektrické energie, která pevně zakotvila do lidské společnosti. Elektrická energie, ale i další nejrůznější druhy energií se jeví jako nepostradatelné pro lidstvo. Od počátku tato spotřeba a závislost na energiích stoupá, ale teprve vznikem průmyslové společnosti je tento vývoj spotřeby energií opravdu strmí.

Takové zvýšení spotřeby všech druhů energií v celosvětovém měřítku se pohybuje asi kolem 4 % ročně, což odpovídá více než dvakrát rychlejšímu růstu světové populace. Na jednoho člověka připadá dvacetkrát větší příkon z energetických zdrojů než je schopen sám při trvalé práci fyzicky vyvíjet. Ve vyspělé průmyslové společnosti je tento příkon ještě značně větší, oproti průměru to může být až desetkrát.



Obr. 1 Dlouhodobý vývoj spotřeby elektřiny v ČR



Obr. 2 Růst světové populace

Prudký rozmach lze vysvětlit životními podmínkami lidské společnosti a některými vážnými problémy technickými, ekonomickými a hygienickými. Závislost na elektrické energii bude neustále stoupat. Tlak na výrobu elektrické energie v příštích letech stále poroste a to v důsledku životního a s ním spojeného průmyslového rozmachu především v tzv. méně rozvinutých zemích. Pro tyto země je to jediná alternativa získání hospodářské soběstačnosti a nezávislosti. Vzrůstající spotřeba energie je dále spojena s rostoucím počtem obyvatel na zemi, z čehož vyplývá i větší spotřeba a závislost na energiích a větší požadavky na výrobu elektrické energie. Tyto požadavky na výrobu elektrické energie bude do budoucna těžké pokrýt pouze klasickými zdroji paliva, jako jsou fosilní paliva, protože zásoby těchto přírodních zdrojů se pořád více zužují. Proto je nutné hledat další zdroje. Adekvátní náhradou fosilních paliv by bylo využití jaderné energie, která zažila velký technický rozvoj a bylo by proto vhodné, aby zaujala toto místo.

1.2 Podstata jaderné energetiky

Poslání jaderné energetiky není pouze zajistit společnosti absolutní dostatek energie, a to i v dlouhodobé perspektivě, při reálných zásobách různých druhů paliv a vydatnosti různých primárních energetických zdrojů. Jaderná energetika nám může přispět při řešení problémů průmyslové společnosti, jako jsou problémy spjaté s řešením vyčerpatelnosti surovin, problémy dostatku potravin a problémy se zachováním přijatelného životního prostředí. Jaderná energetika zasahuje a vývojově pozvedává postupně všechny obory společenské činnosti a stává se tak nástrojem a zároveň i spolehlivým ukazatelem postupu vědeckotechnického rozvoje společnosti.

Jedním z několika rozhodujících faktorů pro volbu jaderné energie jsou náklady na vyrobenou energii. Tyto náklady na výrobu elektřiny z jaderných elektráren dnes již snadno konkurují cenám elektřiny z elektráren na klasická fosilní paliva. Je nutné mít na mysli, že trend cen fosilních paliv pořád stoupá a zásoby těchto surovin se zmenšují.

Jaderné elektrárny jsou ekonomičtější oproti elektrárnám na fosilní paliva i z důvodu nákladu na dopravu paliva. Například na výrobu 1 GWh spotřebuje současná velká jaderná elektrárna asi 400 g uranu, což odpovídá spotřebě zhruba 1000 t velmi kvalitního uhlí. Proto nejsou jaderné elektrárny závislé na poloze místa a výskytu paliva. Velikost zásob jaderných paliv osvobozuje lidstvo od strachu z nedostatku paliv, ale nedá se říct, že jaderná energetika je plnohodnotnou náhradou za fosilní paliva, ale jen jednou z několika alternativních řešení.

Převážná část dnešní světové výroby elektrické energie se realizuje v tepelných elektrárnách na fosilní paliva a elektrárnách vodních. K výstavbě jaderné energetiky vedou i důvody ekologické. Tepelné elektrárny na fosilní paliva, které stále ještě převládají, znečišťují ovzduší škodlivými odpady, především popílkem, NO_x a SO_2 . Znečišťování ovzduší se stalo vážným světovým problémem a tepelné elektrárny na fosilní paliva jsou považovány za jednoho z hlavních ničitelů přírodního a životního prostředí. Jaderné elektrárny naopak nevypouští za provozu do ovzduší žádné spaliny nebo plyny způsobující skleníkový efekt.

Co se týká úniku radioaktivity do okolí jaderné elektrárny, dlouhodobé zkušenosti prokázaly, že skutečná střední dávka pro nejexponovanější osoby v okolí jaderné elektrárny za jejího normálního provozu leží hluboko, až stonásobně níže pod úrovní přírodní radioaktivity.

1.3 Projekt MIR 1200

Projekt MIR 1200 (Modernized International Reactor) je konsorcium firem ŠKODA JS a.s., Atomstrojexport a.s. a OKB Gidropress a.s. Projekt je určen pro výstavbu 3. a 4. energobloku Jaderné elektrárny Temelín, jedná se o výsledek evolučního vývoje technologie s tlakovodními reaktory typu PWR. V současné době probíhá výstavba sedmi bloků VVER-1000/1200 v Rusku a pěti bloků JE v dalších zemích.

Technická vyspělost a spolehlivost bezpečnostních systémů zařízení a primárního okruhu jsou prověřeny dlouhodobou praxí a zkušenostmi v oboru. Byla taktéž ověřena životnost zvolených konstrukčních materiálů i ostatních důležitých částí projektu. Životnost jaderných zařízení na výrobu páry u toho to projektu byla stanovena na 60 let.

Projekt navazuje na dlouhodobé zkušenosti a úsilí ve výstavě jaderné elektrárny ve Finsku. Proto mimo ruských požadavků na kvalitu provozu a bezpečnosti je do projektu zahrnuta i značná finská specifikace dozorných orgánů na základě zkušeností z výstavby dvou bloků JE Loviisa s reaktory VVER-440. Zpracování tohoto projektu bylo realizováno ve spolupráci se širokým okruhem předních evropských i amerických firem. V projektu MIR 1200 byl kladen důraz především na bezpečnost a spolehlivost jaderné elektrárny, proto kromě systémů, které se přímo účastní procesu výroby elektrické energie, jsou účastněné bezpečnostní systémy určené pro předcházení projektovým haváriím a nebo omezení jejich následků. Tyto bezpečnostní systémy jsou zálohovány ve výši 4 x 100 %. Pro napájení spotřebičů bezpečnostních systémů JE se předpokládá systém havarijního elektrického napájení, který zajišťuje spolehlivé napájení ve všech provozních režimech, včetně ztráty provozních a rezervních zdrojů ze sítě. Systém zajištěného elektrického napájení obsahuje autonomní zdroje napájení v podobě diesel-generátorů, akumulátorových baterií, distribučního zařízení a rozvodů.

Bezpečnostní systémy, které jsou realizovány v rámci projektu MIR 1200, jsou postaveny na aktivním a pasivním principu. Část systémů plní současně funkci normálního provozu i bezpečnostní funkce. Kromě bezpečnostních systémů projekt předpokládá speciální technické prostředky určené pro řízení nadprojektových havárií:

- Systém likvidace vodíku v hermetické obálce
- Praktický systém zachytu taveniny
- Systém pasivního chlazení kontejnmentu (4 x 33 %)
- Systém pasivního chlazení parogenerátorů (4 x 33 %)

Jako hlavní výhodo tohoto projektu MIR 1200 lze považovat fakt, že veškeré podstatné komponenty na výrobu páry lze vyrobit v České republice nebo na Slovensku. Reaktory V-491 ve ŠKODA JS, parogenerátory PGV-MKP a tlakové nádoby nejrůznějšího určení ve společnosti Vítkovice, potrubí a armatury v Modřanské potrubní, další zařízení v SES Tlmače, vzduchotechnika v ZVVZ Milevsko, systém kontroly a řízení v PPA Bratislava nebo v ZAT Příbram, nehořlavé kabely, elektrotechnické komponenty a podobně v různých českých firmách. Dalším pokrokovým řešením v projektu je chytré řešení hlavního cirkulačního čerpadla s bezolejovým mazáním, které odstraní hořlaviny z kontejnmentu.

Projekt MIR 1200 poskytne uplatnění pro slovenské i české firmy v širokém rozsahu, to se týká pochopitelně dodávek veškerých prací spojených se stavbou od projektu po logistiku a tak též dlouhodobých servisních služeb pro provozované bloky, což je významné i pro jejich provozovatele do budoucna. Realizací absolutní většiny kvalifikovaných prací v tuzemsku projekt dále přispívá ke zvyšování profesní a vzdělanostní úrovně ekonomiky a mladé generace.

2. SYSTÉM KOMPENZACE OBJEMU CHLADIVA REAKTORU

Systém kompenzace objemu nebo také tlaku chladiva jaderného reaktoru je nezávislý systém reaktoru. Tento systém je trvale připojen k primárnímu okruhu, slouží k vyrovnávání tlakových změn v primárním okruhu, které vznikají vlivem tepelných dilatací chladiva. Tento systém patří mezi velmi důležité prvky primárního okruhu jaderné elektrárny, který zajišťuje měkkost primárního okruhu, tlumí rázy, pulsace a zmenšuje pokles resp. vzrůst tlaku v primárním okruhu. Hlavní částí systému kompenzace objemu je kompenzátor, který plní funkci regulátoru tlaku a objemu kapalného chladiva v primárním okruhu. Pracuje jako vyrovnávací nádrž, doplňující nebo odebírající kapalně chladivo z primárního okruhu při změnách jeho objemu. Kompenzátor objemu je tlaková nádoba, která je zhruba do tří čtvrtin zaplněna chladivem z primárního okruhu. Nad hladinou chladiva v kompenzátoru se nachází parní nebo plynovým polštář, který vytváří v kompenzátoru tlak a taktéž tlak na chladivo v celém primárním okruhu jaderné elektrárny.

Další důležitou funkcí systému kompenzace objemu chladiva je udržování požadovaných parametrů chladiva v primárním okruhu. Jedná se o dodržení minimální a maximální povolené hodnoty teploty a tlaku chladiva. Je nutné dodržet tyto hodnoty, protože by mohlo dojít v primárním okruhu k varu chladiva. Var v primárním okruhu vyvolaný snížením tlaku v primárním okruhu může nabít bublinkového, ale i objemového charakteru a tím vyvolat krizi odvodu tepla i při nízkých tepelných tocích. Jde tedy o stav mimořádně nebezpečný a to nejen z hlediska odvodu tepla, ale i z možností vzniku těžko identifikovatelných lokálních parních bublin mimo kompenzátor objemu, například pod víkem tlakové nádoby reaktoru a v kolektorech parogenerátoru a v neposlední řadě i z hlediska nestability chodu hlavního cirkulačního čerpadla, vzrůstající kavitací na sání. Je tedy nutné udržovat stav vody v primárním okruhu vždy pod dolní mezní křivkou. Jediným místem v primárním okruhu, kde voda smí být na dolní mezní křivce je kompenzátor objemu.

3. KOMPENZÁTORY OBJEMU

3.1 Kompenzátory objemu s plynovým polštářem

U kompenzátorů objemu s plynovým polštářem je plynový polštář tvořen nejčastěji dusíkem, má to hlavně ekonomické důvody, vhodným plynem by byl též argon, ale dusík je mnohem levnější. Plynový polštář svou stlačitelností umožňuje vyrovnávat tepelné dilatace vody v primárním okruhu.

U všech nověji postavených a stavěných reaktorů typu VVER se používají kompenzátory objemu s parním polštářem. Dusík jako plyn vhodný a také nejlevnější se u kompenzátorů objemu s parním polštářem stále používá při najiždění reaktoru ze studeného stavu, při jeho odstavování a také během provozu k ředění třaskavé směsi v barbotážní nádrži.

Při provozu reaktoru dochází pravidelně ke změnám teploty chladiva. Tyto změny jsou ale daleko větší při změnách jako jsou najiždění nebo odstávka reaktoru. Při takovýchto změnách se v závislosti na teplotě mění i objem chladiva a tím v uzavřené smyčce primárního okruhu ke změně tlaku chladiva.

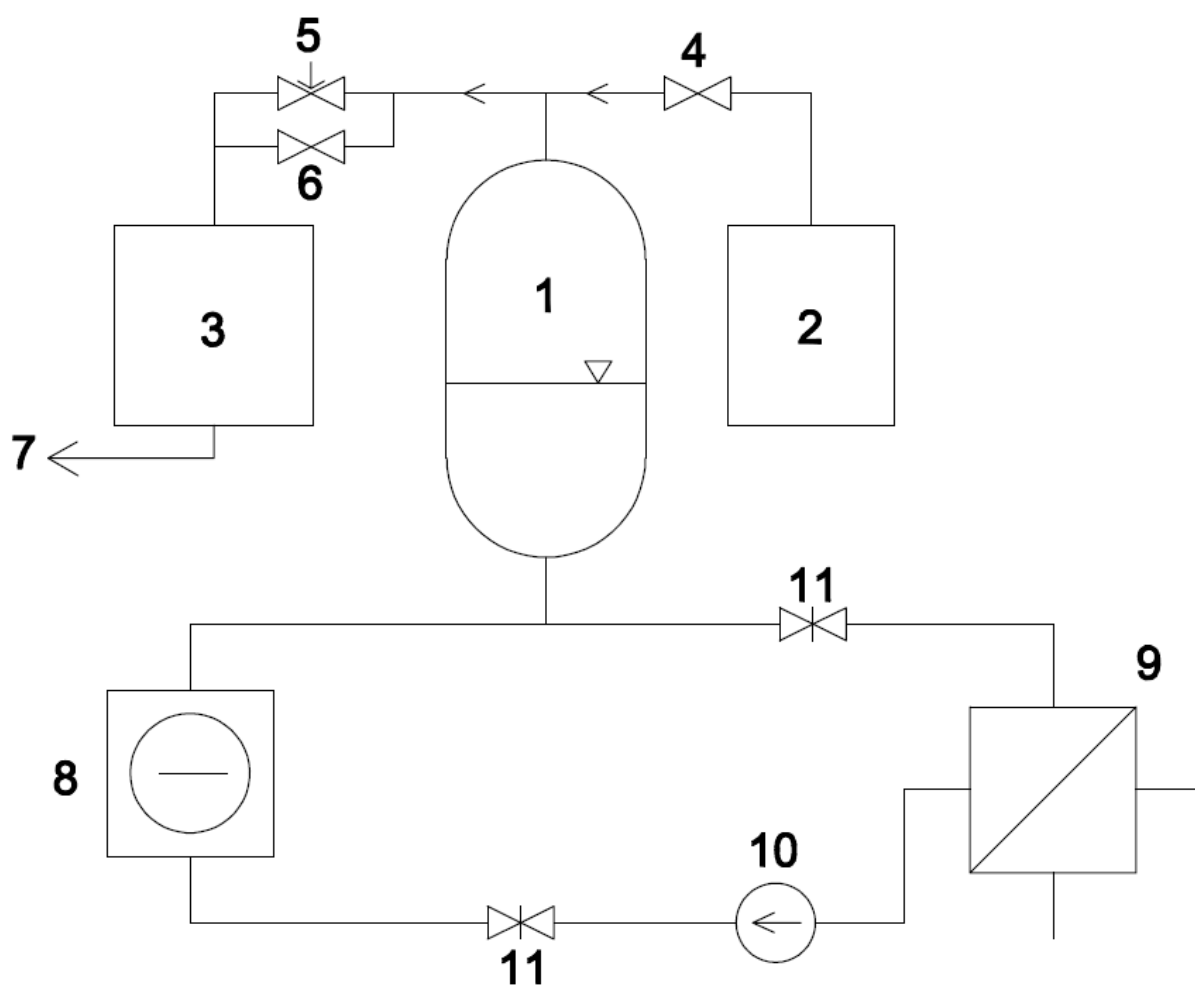
Je nutné tyto změny tlaku regulovat, proto se do nejvyššího bodu primárního okruhu umísťuje tlaková nádoba s plynovým polštářem, která je spojena potrubím s primárním okruhem. Takže při zvýšení teploty chladiva a zvětšení jeho objemu může část chladiva přetéct do této tlakové nádoby zvané kompenzátor objemu. Následně v kompenzátoru objemu dochází ke stlačení plynového polštáře, který vytváří tlak nad hladinou vody v kompenzátoru. Při snížení teploty v primárním okruhu odtéká naopak voda z kompenzátoru objemu zpět do větve primárního kruhu.

Kompenzátory objemu chladiva jsou využitelné pouze u tlakovodních a vodovodních reaktorů. U varných reaktorů zastává jejich funkci parní objem reaktoru nebo bubnu, sloužící jako separátor vlhkosti a páry. Kompenzátory objemu u tlakovodních reaktorů je nutné připojovat tak, aby byly spojeny k neodpojitelné části jedné smyčky primárního okruhu. Znamená to tedy připojit kompenzátor mezi reaktor a hlavní uzavírací armaturu. Takovýto způsob spojení je vhodný proto, aby nemohlo dojít

k oddělení kompenzátoru od reaktoru při uzavření hlavních uzavíracích armatur na příslušné smyčce primárního okruhu. U většiny postavených jaderných elektráren byla dána přednost kompenzátoru objemu s parním polštářem. Upřednostnění kompenzátoru objemu s parním polštářem před kompenzátozem s plynovým polštářem vedlo konstruktéry proto, že se objevily problémy s používáním dusíku u kompenzátoru s plynovým polštářem. Hlavní problém se objevil v souvislosti s pronikáním dusíku do primární vody a s možností vzniku kyseliny dusičné, která by způsobovala korozi. Později se také objevilo řešení v podobě korigování vodního režimu primárního okruhu přidáváním čpavku a použitím katexu při úpravě vody primárního okruhu. Je také nutné používat co nejčistější dusík bez kyslíku, který by způsoboval koroze. Z toho to samého důvodu není možné používat v kompenzátorech objemu vzduch k vytvoření plynového polštáře.

FUNKCE SYSTÉMU KOMPENZACE OBJEMU S PLYNOVÝM POLŠTÁŘEM

Při zvyšování výkonu reaktoru a zvyšování teploty chladiva, stoupá hladina a tlak v kompenzátoru objemu. K udržení tlaku se odvádějí plyny z kompenzátoru objemu přes přepouštěcí ventily, při velkém vzrůstu tlaku případně i přes pojistné ventily do nádrže na odvedené plyny, odkud se po určité době mohou vypouštět po snížení aktivity do komína. Při snižování teploty a objemu chladiva v primárním okruhu dojde ke snížení hladiny a tlaku v kompenzátoru objemu. Vyrovnání tlaku v kompenzátoru se děje připouštěním dusíku přes regulační ventily ze zásobníků dusíku, které mohou být doplňovány kompresorem.

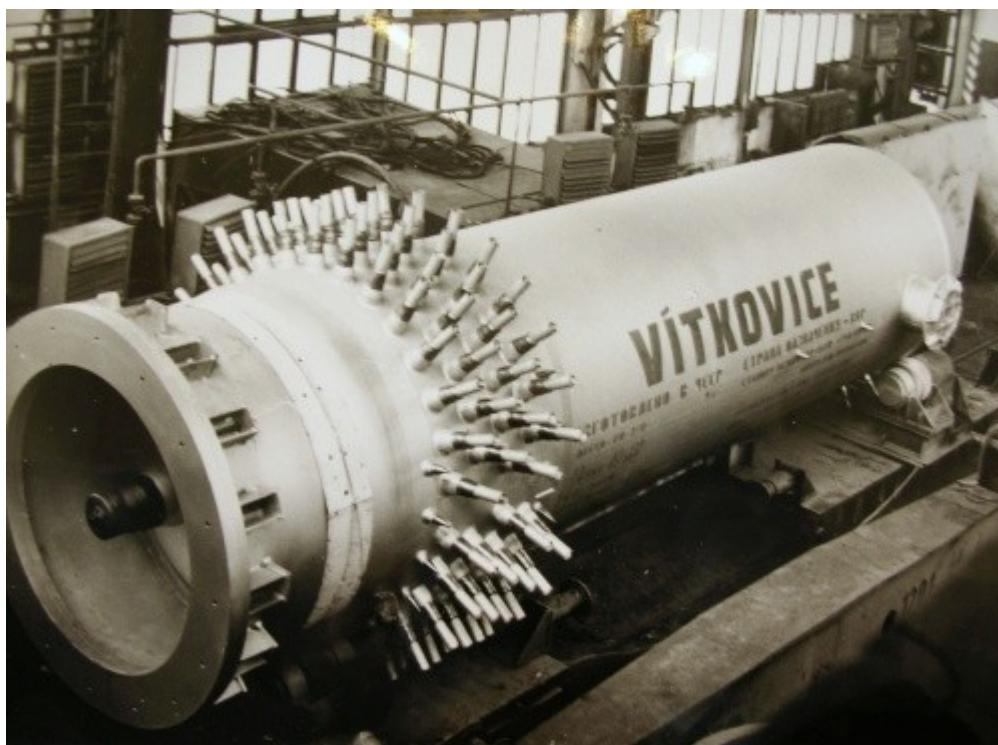


Obr. 3 Schéma kompenzace objemu s plynovým kompenzátorem

- 1 – kompenzátor objemu
- 2 – zásobní nádrž dusíku
- 3 – nádrž na plyny odvedené z kompenzátoru objemu
- 4 – regulační ventil pro připouštění dusíku do kompenzátoru objemu
- 5 – pojistné ventily
- 6 – přepouštěcí ventily
- 7 – odvod přes filtry do komína
- 8 – reaktor
- 9 – parní generátor
- 10 – hlavní cirkulační čerpadlo
- 11 – hlavní uzavírací armatury

HLAVNÍ NEVÝHODY KOMPENZÁTORŮ OBJEMU S DUSÍKOVÝM POLŠTÁŘEM

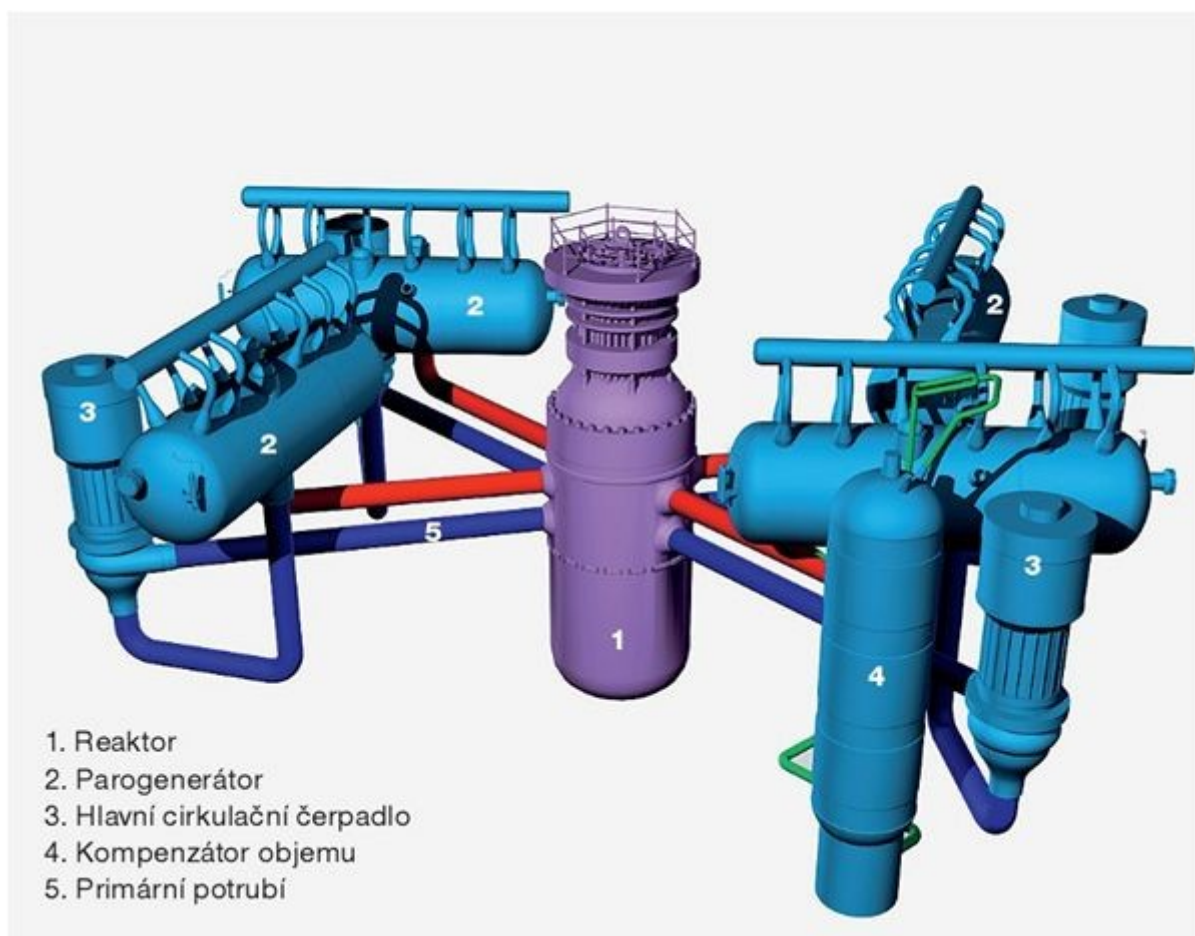
- Při průtoku dusíku s obsaženou vodní párou pojistnými ventily kritickou rychlostí dochází k namrzání vody na sedle ventilu, takže se může stát, že po poklesu tlaku ventil dobře nedosedne a tedy nezavře.
- Dusík se rozpouští ve vodě, vznikají kyseliny dusičná a dusitá, které znesnadňují udržování předepsaného vodního režimu v primárním okruhu.
- Dusíkové kompenzátory objemu mají větší objem než kompenzátory s parním polštářem zhruba 1,5 až 2 krát.



Obr. 4 Kompenzátor objemu s parním polštářem

3.2 Kompenzátory objemu s parním polštářem

Kompenzátory objemu s parním polštářem jsou nejrozšířenější používaný druh kompenzátorů. Těmito kompenzátory jsou vybaveny všechny momentálně stavěné tlakovodní elektrárny a také všechny jaderné elektrárny u nás. Funkce kompenzátoru objemu s parním polštářem je obdobná jako u kompenzátoru objemu s plynovým polštářem s tím rozdílem, že polštář nad hladinou v kompenzátoru je parní, vytvořený odpařeným chladivem z primárního okruhu. Systém kompenzace objemu pomocí parního polštáře se skládá z několika důležitých částí jako je samotný kompenzátor objemu, barbotážní neboli přepouštěcí nádrže a z pojistných, regulačních a jiných ventilů a příslušenství.

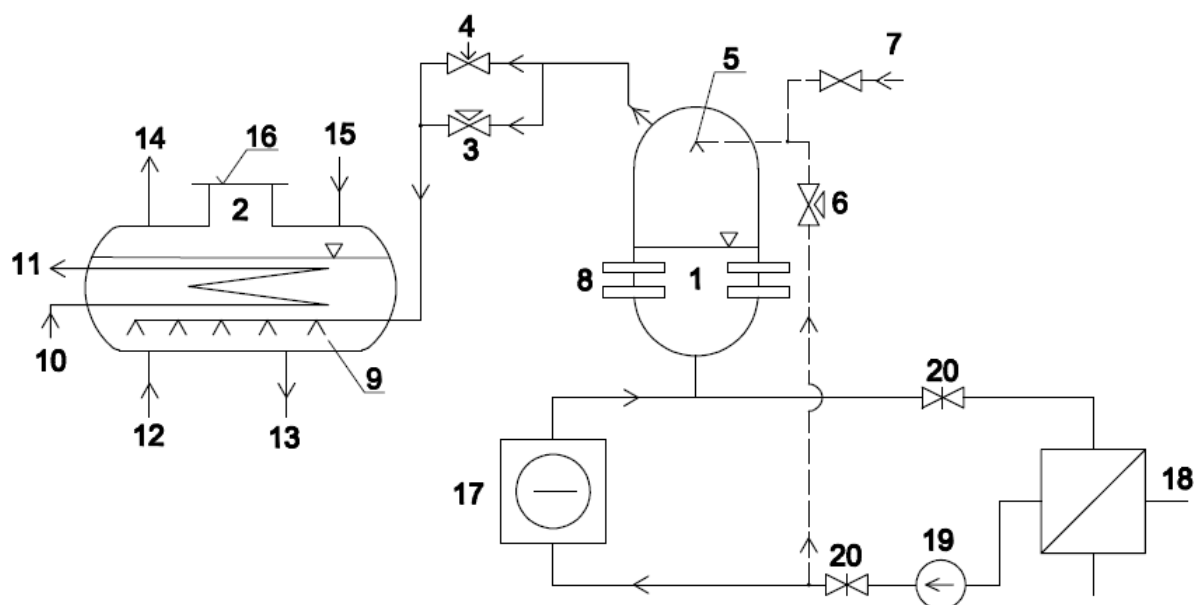


Obr. 5 Model primárního okruhu

Kompenzátor objemu s parním polštářem je tlaková nádoba, která je z části zaplněna chladivem z primárního okruhu. Chladivo přetéká do kompenzátoru trvale spojeným potrubím, které spojuje neoddělitelně kompenzátor a horkou větev jedné ze smyček primárního okruhu. Kompenzátor je umístěn výše jak celý primární okruh, shromažďují se v něm všechny plyny uvolněné v primárním okruhu. Vyrovnávání tlaku v kompenzátoru objemu a následná regulace při změně režimů primárního okruhu je prováděno pomocí parního polštáře, který se vytváří nad vodní hladinou chladiva. Dojde-li k poklesu tlaku v kompenzátoru na nepovolenou mez, zapnou se automaticky elektrické ohříváky vody, které způsobí var chladiva v kompenzátoru, následně vývin páry a zvýšení tlaku.

Po dosažení předepsaného tlaku se ohříváky samočinně vypnou. Pokud nastane opačný stav, tedy kdy bude zapotřebí snížit tlak, otevře se regulační ventil, kterým se dopraví voda ze studené větve primárního okruhu k tryskám v horní části kompenzátoru a následně dojde k rozprášení vody do parního prostoru kompenzátoru objemu. Tím dochází k ochlazení a kondenzaci páry a snížení tlaku. Snížení tlaku lze také provádět ručně z blokové dozorny, tedy když operátor otevře přepouštěcí ventily a přepustí páru z kompenzátoru do barbotážní nádrže. V případě velkého zvýšení tlaku se samočinně otevrou pojistné ventily a přepustí páru do barbotážní nádrže. Tato přepouštěná pára je zaváděná do vodního prostoru barbotážní nádrže pomocí trysek, aby byla urychlena její kondenzace.

Voda v barbotážní nádrži je ochlazována svazkem trubkových hadů, jimiž proudí chladicí médium. Z kompenzátoru objemu kromě páry jsou do barbotážní nádrže přiváděny i jiné nekondenzující plyny, kterým je ve větším množství převážně vodík. Vytvářejí třaskavý plyn, proto musí být koncentrace vodíku v barbotážní nádrži snižována téměř pod hodnotu 2,5 %. Tato koncentrace je snižována přiváděním nejčastěji dusíku do nádrže. Vodík a další nekondenzující plyny jsou dále odváděny potrubím do spalovacího zařízení, kterým jsou vybaveny jaderné elektrárny. Pro případné selhání chladicího systému je barbotážní nádrž opatřena pojistnou havarijní membránou, která se při překročení maximálního tlaku protrhne a zabráni tak prasknutí barbotážní nádrže. Tato horní mez maximálního tlaku se pohybuje kolem hodnoty 1,45 MPa.



Obr. 6 Schéma kompenzace s parním kompenzátorem

- 1 – kompenzátor objemu
- 2 – barbotážní nádrž
- 3 – ventil pro přepouštění páry z kompenzátoru objemu do barbotážní nádrže
- 4 – pojistné ventily pro přepouštění páry z kompenzátoru objemu do barbotážní nádrže
- 5 – vstřikovací trysky
- 6 – regulační ventil vstřikované vody
- 7 – přívod vody od doplňovacích čerpadel
- 8 – elektrické ponorné ohříváky
- 9 – trysky, jimiž se přivádí pára z kompenzátoru objemu do vodního prostoru barbotážní nádrže
- 10 – přívod chladicí vody do trubkových hadů, ochlazujících barbotážní nádrž
- 11 – výstup chladicí vody
- 12 – přívod čistého kondenzátu
- 13 – odvod vody do nádrže nečistého kondenzátu
- 14 – odvod vodíku k systému spalování
- 15 – přívod dusíku do barbotážní nádrže
- 16 – pojistná havarijní membrána
- 17 – reaktor
- 18 – parní generátor
- 19 – hlavní cirkulační čerpadlo
- 20 – hlavní uzavírací šoupátka

4. VÝPOČET SPRCHOVÉHO A OHŘÍVACÍHO SYSTÉMU

4.1 Sprchový systém

Při navrhování sprchového systému postupujeme tak, abychom zohlednili veškeré možné situace a režimy primárního okruhu, které mohou nastat během provozu. Je nutné naddimenzovat sprchový systém tak, aby spolehlivě a bezpečně plnil funkci i během poruchového stavu, např. při neotevření pojistných ventilů pro přepouštění páry z kompenzátoru objemu do barbotážní nádrže.

Pro výpočet sprchového systému se využívají rovnici z matematického modelu kompenzátoru objemu. Matematický model byl sestaven na katedře energetiky na Vysoké škole Báňské při řešení návrhu kompenzátoru objemu pro VVER 1000.

Pro výpočet byl předpokládán nejvyšší tlak v kompenzátoru 16,3 MPa, kdy je třeba maximálního průtoku sprchami systému. Uvažujeme, že všechny pojistné ventily jsou dokonale uzavřeny $m_v = 0$ a elektroohříváče nepracují $m_e = 0$. Množství primárního chladiva přitékajícího, respektive odtékajícího z kompenzátoru objemu je roven $(m_p + m_r) = 0$

Vstupní údaje pro výpočet:

$T'' = 348,3$	$[^{\circ}C]$	$m_2 = 3056,82$	$[kg]$
$T_s = 346$	$[^{\circ}C]$	$S_I = 46,04$	$[m^2]$
$T_I = 348$	$[^{\circ}C]$	$S_{II} = 6,5$	$[m^2]$
$v'' = 0,009029$	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$	$\alpha_I = 0,3$	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$v_I = 0,001727$	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$	$\alpha_{II} = 100$	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$i'' = 2573$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	$\alpha_{III} = 3$	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$i' = 1662$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	$E_3 = 6,8256 \cdot 10^{-4}$	$[-]$
$i_s = 1290$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	$\dot{p} = 0,15$	$[MPa]$

Tepelný výkon přecházející z páry do stěn kompenzátoru objemu:

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T'' - T_s) = 0,3 \cdot 46,04 \cdot (348,3 - 346) = 31,77 \quad [kW] \quad (1)$$

Hmotnostní tok kondenzátu ze stěn:

$$\dot{m}_K = \frac{P_I}{i'' - i'} = \frac{31,77}{2573 - 1662} = 0,035 \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

Tepelný výkon přecházející z páry do vody při kondenzaci páry na vodní hladině:

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T'' - T_1) = 100 \cdot 6,5 \cdot (348,3 - 348) = 195 \quad [kW] \quad (3)$$

Hmotnostní tok kondenzátu vzniklého kondenzací na hladině:

$$\dot{m}_h = \frac{P_{II}}{i'' - i'} = \frac{195}{2573 - 1662} = 0,215 \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (4)$$

Změna množství vody:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_S + \dot{m}_{CH} + \dot{m}_K + \dot{m}_H \quad (5)$$

Změna množství páry:

$$\dot{m}_2 = -\dot{m}_{CH} - \dot{m}_K - \dot{m}_H \quad (6)$$

Časová změna tlaku v kompenzátoru objemu:

$$\dot{p} = \frac{m_2 \cdot v'' + \dot{m}_1 \cdot v_1}{m_2 \cdot E_3} \quad (7)$$

$$E_3 = \frac{v'' - v'}{i'' - i'} \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{dv''}{dp} \quad (8)$$

Vztah pro výpočet maximálního průtoku sprchovým systémem dostaneme dosazením do rovnice pro časovou změnu tlaku:

$$\dot{m}_s = \frac{\frac{\dot{p} \cdot m_2 \cdot E_3}{v'' - v_1} + \dot{m}_K + \dot{m}_H}{\frac{i' - i_s}{i'' - i'} + \frac{v_1}{v'' - v_1}} \quad (9)$$

$$\dot{m}_s = \frac{\frac{0,15 \cdot 3056,82 \cdot 6,8256 \cdot 10^{-4}}{0,009029 - 0,001727} + 0,035 + 0,215}{\frac{1662 - 1290}{2573 - 1662} + \frac{0,001727}{0,009029 - 0,001727}} = 65 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

V primárním okruhu jaderné elektrárny MIR 1200 je při zvýšení tlaku v kompenzátoru objemu o 0,15 MPa nutný maximální průtok chladiva sprchovým systémem $65 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

4.2 Ohřívací systém

Postup při návrhu elektroohříváčů je obdobný jako při návrhu sprchového systému, opět vycházíme z rovnic matematického modelu kompenzátoru objemu. Při výpočtu předpokládáme pokles tlaku na hodnotu 15,2 MPa, kdy je výkon elektroohříváčů maximální. Odvod páry pojistnými ventily se nekoná $m_v = 0$, množství vody přitékající sprchovým systémem je nulové $m_s = 0$ a tím i množství vody zkondenzované na sprchových kapkách $m_{CH} = 0$. Množství primárního chladiva přitékajícího, respektive odtékajícího z kompenzátoru objemu je $(m_p + m_r) = 0$

Vstupní údaje pro výpočet:

$T''_{II} = 343$	$[^{\circ}C]$	$\dot{p} = 0,011$	$[MPa]$
$T_s = 341$	$[^{\circ}C]$	$m_2 = 2721,9$	$[kg]$
$v''_{II} = 0,01014$	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$	$S_I = 46,04$	$[m^2]$
$v_I = 0,001668$	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$	$S_{II} = 6,5$	$[m^2]$
$i''_{II} = 2606$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	$\alpha_I = 0,3$	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$i' = 1618$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	$\alpha_{II} = 100$	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
		$E_3 = 8,1 \cdot 10^{-4}$	$[-]$

Tepelný výkon přecházející z páry do stěn kompenzátoru objemu:

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T''_{II} - T_s) = 0,3 \cdot 46,04 \cdot (343 - 341) = 27,63 \quad [kW] \quad (10)$$

Hmotnostní tok kondenzátu ze stěn:

$$\dot{m}_K = \frac{P_I}{i''_{II} - i'} = \frac{27,63}{2606 - 1618} = 0,028 \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (11)$$

Tepelný výkon přecházející z páry do vody při kondenzaci páry na vodní hladině:

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T''_{II} - T_I) = 100 \cdot 6,5 \cdot (343 - 342,7) = 195 \quad [kW] \quad (12)$$

Hmotnostní tok kondenzátu vzniklého kondenzací páry na hladině:

$$\dot{m}_H = \frac{P_{II}}{i''_{II} - i'} = \frac{195}{2606 - 1618} = 0,197 \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (13)$$

Změna množství vody v kompenzátoru objemu:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_K + \dot{m}_H - \dot{m}_E \quad (14)$$

Změna množství páry:

$$\dot{m}_2 = -\dot{m}_K - \dot{m}_H + \dot{m}_E = -\dot{m}_1 \quad (15)$$

Množství páry vzniklé činností elektroohříváčů:

$$\dot{m}_E = \frac{P_E}{i''_{II} - i'} \quad (16)$$

Změna tlaku:

$$\dot{p} = \frac{\dot{m}_2 \cdot v''_{II} + \dot{m}_1 \cdot v_1}{m_2 \cdot E_3} \quad (17)$$

Dosazením vztahů pro \dot{m}_1 , \dot{m}_2 , \dot{m}_E do rovnice pro \dot{p} můžeme získat vztah pro výpočet výkonu elektroohříváčů:

$$\begin{aligned} P_E &= \left(\frac{\dot{p} \cdot m_2 \cdot E_3}{v'' - v'} + \dot{m}_K + \dot{m}_H \right) \cdot (i''_{II} - i') \\ P_E &= \left(\frac{0,011 \cdot 2721,9 \cdot 8,1 \cdot 10^{-4}}{0,01014 - 0,001668} + 0,028 + 0,197 \right) \cdot (2606 - 1618) \\ P_E &= 3050 \quad [kW] \end{aligned} \quad (18)$$

Při snížení tlaku v kompenzátoru o 0,011 MPa je nutný maximální výkon elektroohříváčů 3050 kW.

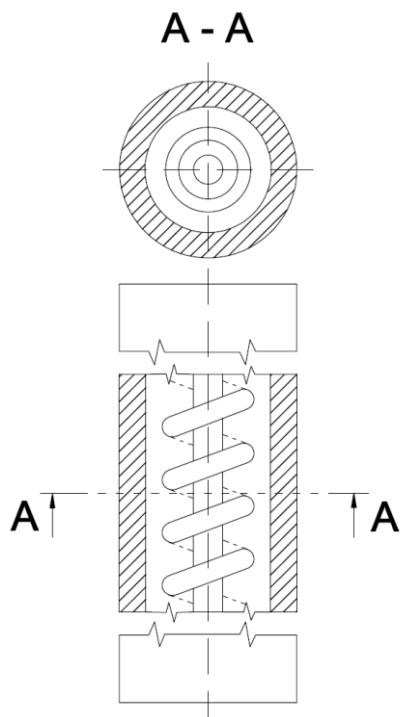
5. NÁVRH SVISLÝCH TRUBKOVÝCH ELEKTROOHŘÍVAČŮ (TEO)

L	délka topné části TEO
h	stoupání spirály
d_s	střední průměr spirály
d	průměr TEO
n	celkový počet TEO
Q_j	výkon jednoho ohříváče
Q_c	celkový tepelný výkon
P_1	povrchové zatížení
R_o	měrný odpor
ΔU_1	úbytek napětí pro daný průměr ohříváče
I_D	dovolený proud
I_1	dovolený proud pro daný průměr ohříváče a povrchové zatížení

Volené vstupní údaje pro výpočet:

$$\begin{aligned}
 L &= 2750 \quad [mm] \\
 d &= 30 \quad [mm] \\
 h &= 6 \quad [mm] \\
 d_s &= 11 \quad [mm]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{O(50^\circ)} &= 1,158 \quad [\Omega \cdot mm^2 \cdot mm^{-1}] \\
 Q_c &= 3050 \quad [kW] \\
 \Delta U_1 &= 23,7 \quad [V] \\
 U &= 380 \quad [V] \\
 n &= 50 \quad [-]
 \end{aligned}$$



Obr. 7 Trubkový elektroohříváč

Výpočet výkonu jednoho ohříváče:

$$Q_j = \frac{Q_c}{n} = \frac{3050000}{50} = 61000 \quad [W] \quad (19)$$

Navrhovaná délka topného odporu:

$$\begin{aligned} l_d &= \frac{L}{h} \cdot \sqrt{(\pi \cdot d_s^2) + h^2} + L \\ l_d &= \frac{275}{0,6} \cdot \sqrt{(\pi \cdot 1,1^2) + 0,6^2} + 275 \\ l_d &= 1883 \quad [cm] \end{aligned} \quad (20)$$

Zdrojové teplo:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{4 \cdot Q_j}{\pi \cdot d^2 \cdot l_d} \\ Q &= \frac{4 \cdot 61000}{\pi \cdot 3^2 \cdot 1883} \\ Q &= 4,59 \quad [W \cdot cm^{-3}] \end{aligned} \quad (21)$$

Tepelný tok na povrchu vodiče:

$$P_1 = Q \cdot \frac{d}{4} = 4,59 \cdot \frac{3}{4} = 3,443 \quad [W \cdot cm^2] \quad (22)$$

Úbytek napětí:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_1 \cdot \sqrt{P_1} \sqrt{R_o} \\ \Delta U &= 23,7 \cdot \sqrt{3,443} \cdot \sqrt{1,158} \\ \Delta U &= 47,32 \quad [V] \end{aligned} \quad (23)$$

Proud v TEO:

$$\begin{aligned} I &= \frac{Q_j}{(U - \Delta U)} \\ I &= \frac{61000}{(380 - 23,7)} = 171 \quad [A] \end{aligned} \quad (24)$$

Odpor TEO:

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{(U - \Delta U)}{I} \\
 R &= \frac{(380 - 23,7)}{171} \\
 R &= 2,0836 \quad [\Omega]
 \end{aligned} \tag{25}$$

Vypočtené hodnoty se pohybují v přijatelné toleranci, hodnota procházejícího proudu ohřívacem je 171 A, což je vyhovující pro tento materiál, který dovoluje maximální hodnotu proudu až 200 A

KONTROLA PRACOVNÍ TEPLoty ELEKTROOHŘÍVAČŮ A TEPELNÝCH TOKŮ

Parametry navrženého svislého trubkového elektroohříváče:

$$\begin{array}{ll}
 d_1 = 25 \quad [mm] & \lambda_{350} = 20,3 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \\
 d_2 = 19 \quad [mm] & \lambda_{415} = 15,9 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \\
 d_3 = 12,2 \quad [mm] & \lambda_{455} = 21,5 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \\
 d_4 = 9,8 \quad [mm] & \lambda_{495} = 14 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \\
 d_5 = 3 \quad [mm] & \lambda_{520} = 22,4 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \\
 L = 2750 \quad [mm] &
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 q_1 &= \frac{Q_j}{(\pi \cdot d_1 \cdot L)} \\
 q_1 &= \frac{61000}{(\pi \cdot 2,5 \cdot 275)} & t_{s1} &= 350 \quad [^{\circ}C] \\
 q_1 &= 28,25 \quad [W \cdot cm^{-2}]
 \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
 t_{s2} &= \frac{q_1 \cdot r_2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{\lambda_{350}} + t_{s1} \\
 t_{s2} &= \frac{28,25 \cdot 0,95 \cdot \ln\left(\frac{1,25}{0,95}\right)}{0,203} + 350 \\
 t_{s2} &= 386,3 \quad [^{\circ}C]
 \end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
q_2 &= \frac{Q_j}{(\pi \cdot d_2 \cdot L)} \\
q_2 &= \frac{61000}{(\pi \cdot 1,9 \cdot 275)} \\
q_2 &= 37,2 \quad [W \cdot cm^{-2}]
\end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
t_{s3} &= \frac{q_2 \cdot r_3 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)}{\lambda_{415}} + t_{s2} \\
t_{s3} &= \frac{37,2 \cdot 0,61 \cdot \ln\left(\frac{0,95}{0,61}\right)}{0,159} + 386,3 \\
t_{s3} &= 450 \quad [^{\circ}C]
\end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{aligned}
q_3 &= \frac{Q_j}{(\pi \cdot d_3 \cdot L)} \\
q_3 &= \frac{61000}{(\pi \cdot 1,22 \cdot 275)} \\
q_3 &= 57,9 \quad [W \cdot cm^{-2}]
\end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
t_{s4} &= \frac{q_3 \cdot r_4 \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_4}\right)}{\lambda_{455}} + t_{s3} \\
t_{s4} &= \frac{57,9 \cdot 0,49 \cdot \ln\left(\frac{0,61}{0,49}\right)}{0,215} + 450 \\
t_{s4} &= 479 \quad [^{\circ}C]
\end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
q_4 &= \frac{Q \cdot \frac{d_5}{4} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}{(\pi \cdot d_4 \cdot L)} \\
q_4 &= \frac{4590 \cdot \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 2750}{(\pi \cdot 9,8 \cdot 2750)} \\
q_4 &= 10,54 \quad [W \cdot cm^{-2}]
\end{aligned} \tag{32}$$

$$t_{s5} = \frac{q_4 \cdot r_5 \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_5}\right)}{\lambda_{495}} + t_{s4}$$

$$t_{s5} = \frac{10,54 \cdot 0,15 \cdot \ln\left(\frac{0,49}{0,15}\right)}{0,14} + 479$$

$$t_{s5} = 493 \quad [^{\circ}\text{C}]$$
(33)

$$q_5 = Q \cdot \frac{d_5}{4}$$

$$q_4 = 4590 \cdot \frac{3}{4}$$

$$q_4 = 34,45 \quad [W \cdot cm^{-2}]$$
(34)

Nejvyšší dosažená teplota ohříváče:

$$t_o = \frac{Q \cdot d_5}{(4 \cdot \lambda_{520})} + t_{s5}$$

$$t_o = \frac{4,59 \cdot 0,3}{(4 \cdot 0,224)} + 493$$

$$t_o = 495 \quad [^{\circ}\text{C}]$$
(35)

Střední pracovní teplota:

$$t_{STR} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_{s3} + t_{s4}}{2} + \frac{t_{s5} + t_o}{2} \right)$$

$$t_{STR} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{450 + 479}{2} + \frac{493 + 495}{2} \right)$$

$$t_{STR} = 480 \quad [^{\circ}\text{C}]$$
(36)

Vypočtená střední pracovní teplota pro navrhovaný svislý trubkový elektroohříváč je přijatelná a pohybuje se v únosné toleranci. Předem zvolená teplota byla 500°C pro kterou byl určen měrný odpor elektroohříváče.

Hodnota maximální dosažené teploty ohříváče odpovídá 495°C, což je vyhovující s ohledem na použitý materiál ohříváče, který dovoluje užití maximální teploty 1050°C .

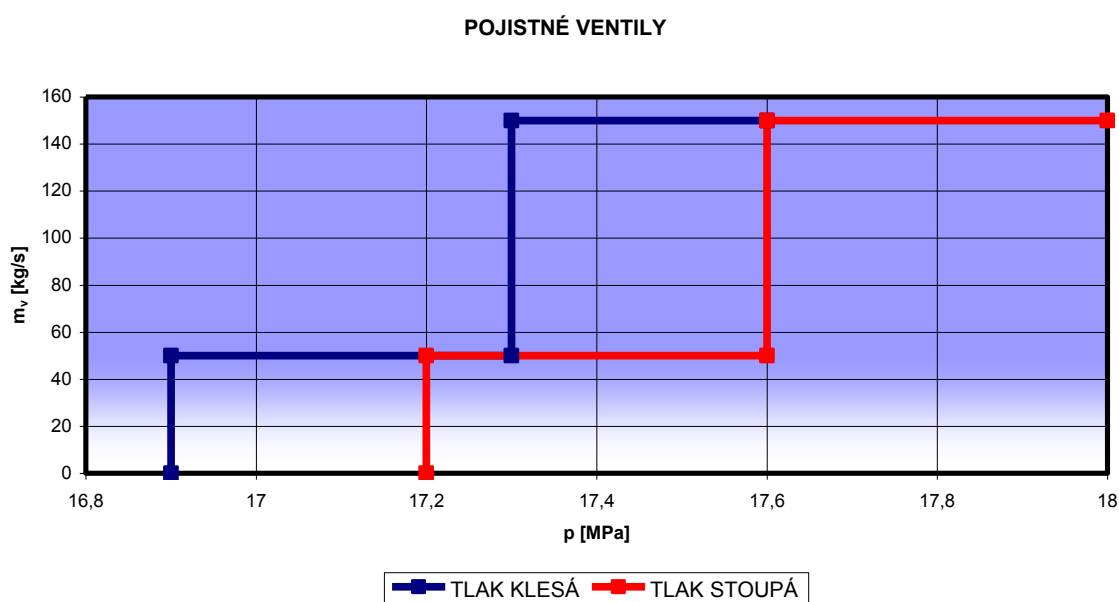
6. PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY

Provozní charakteristika kompenzátoru objemu je založena na provozních charakteristikách tří systému a to sprchového, pojistného a ohřívacího systému. Tyto systémy se uvedou samostatně do činnosti v závislosti na aktuálních provozních podmínkách v kompenzátoru objemu. Spuštění sprchového systému je zadáno jako funkce tlaku v kompenzátoru a průtok sprchovací vody v závislosti na entalpii, která je funkcí teploty a tlaku ve studené větvi primárního okruhu. Průtok páry pojistnými ventily je dán jako funkce odchylky tlaku od počáteční hodnoty tlaku v kompenzátoru. Spuštění ohřívacího systému a regulace tepelného výkonu elektroohříváčů je rovněž dána v závislosti na tlaku s tím, že se uvažuje s úplným přenosem tepelného výkonu do vodního objemu.

Název	Označení	Hodnota	Jednotka
Počáteční tlak	p	15,7	<i>MPa</i>
Objem vody	V ₁	63,25	<i>m</i> ³
Objem páry	V ₂	27,6	<i>m</i> ³
Přestup pára – stěna	α _I	0,3	<i>kW</i> · <i>m</i> ⁻² · <i>K</i> ⁻¹
Přestup pára – voda	α _{II}	100	<i>kW</i> · <i>m</i> ⁻² · <i>K</i> ⁻¹
Přestup voda – stěna	α _{III}	3	<i>kW</i> · <i>m</i> ⁻² · <i>K</i> ⁻¹
Průměr KO	d	3	<i>m</i>
Počáteční teplota stěny	T _S	346	°C

6.1 Charakteristika pojistného systému

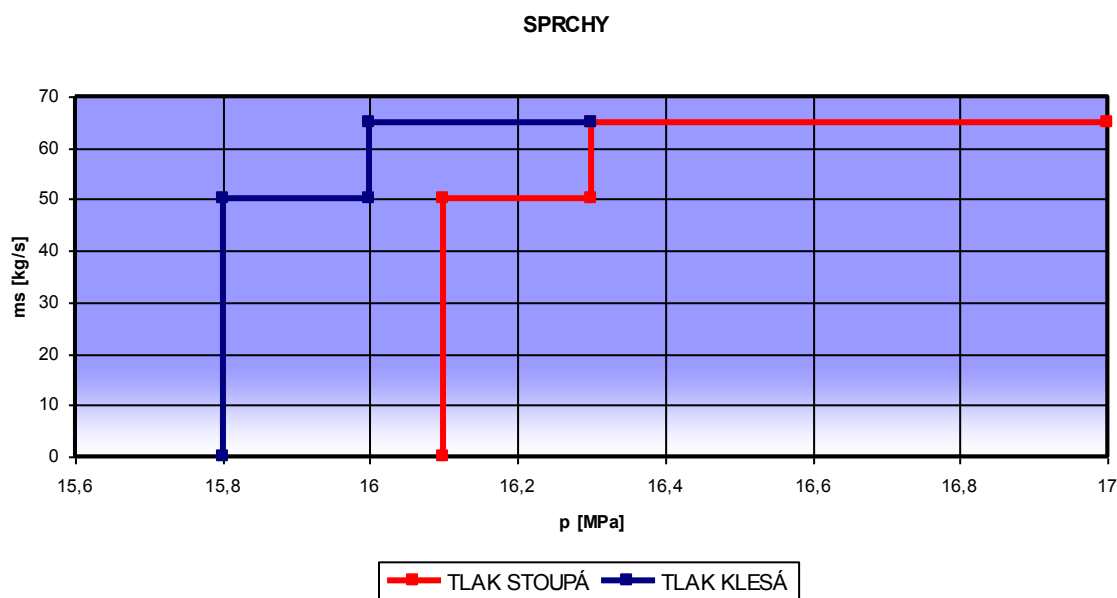
Pojistné ventily	1.	2.	Jednotka
Otevírací tlak	17,2	17,6	MPa
Zavírací tlak	16,9	17,3	MPa
Průtočné množství	50	150	$kg \cdot s^{-1}$



Pokud dochází k neustálému zvyšování tlaku v kompenzátoru nad nepovolenou mez i po té co byl zpuštěn sprchový systém, dostává se na řadu pojistný systém. Tento systém obsahuje dva pojistné ventily, které lze ovládat jak ručně tak automaticky. První z ventilů se otevře při dosažení tlaku 17,2 MPa a zůstává otevřen dokud se tlak nesníží na hodnotu 16,9 MPa. Pokud nastane stav, kdy i při otevření prvního ventilu tlak stoupá, tak dojde k otevření i druhého ventilu při tlaku 17,6 MPa a zůstávají oba neustále otevřené a přepouští páru do barbotážní nádrže, dokud se tlak nesníží. Při snížení tlaku dochází při hodnotě 17,3 MPa k uzavření druhého ventilu a přepouštění páry pokračuje prvním ventilem, který během dalšího snižování tlaku se za nedlouho taktéž samočinně uzavře.

6.2 Charakteristika sprchového systému

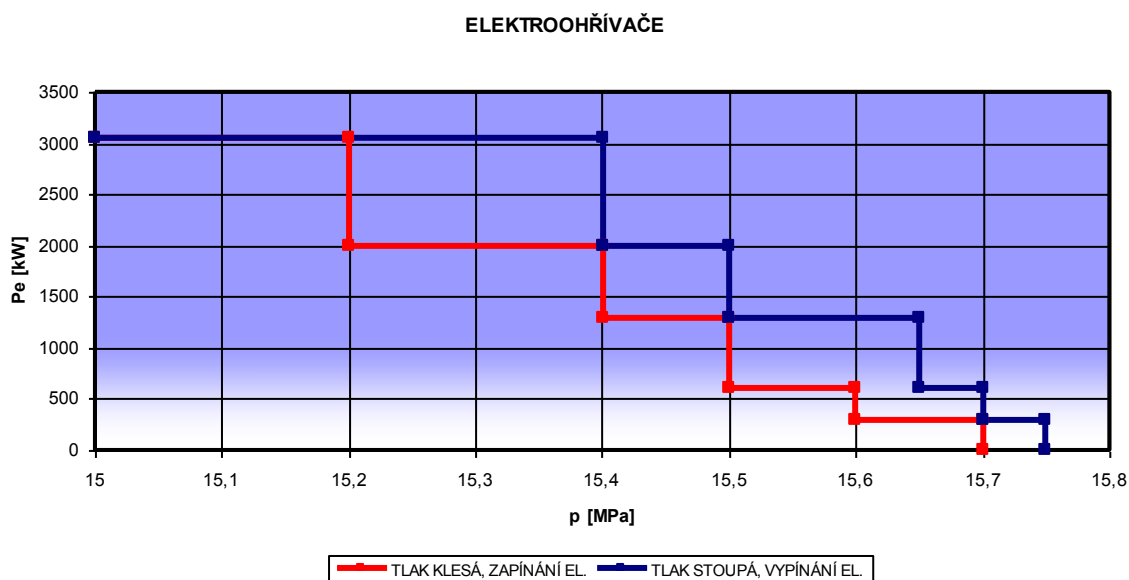
Sprchový systém	Hlavní	Rezervní	Jednotka
Otevírací tlak	16,1	16,3	MPa
Zavírací tlak	15,8	16	MPa
Průtočné množství	50	15	$kg \cdot s^{-1}$
Max. průtok sprchami	65		$kg \cdot s^{-1}$



Při provozu jaderného reaktoru se například vlivem zvýšení tepelného výkonu reaktoru zvýší teplota chladiva v primárním okruhu a následně dojde vlivem tepelné dilatace chladiva ke zvýšení objemu chladiva v primárním okruhu. V kompenzátoru objemu a taktéž v celém okruhu nastane okamžitě zvýšení tlaku. Toto zvýšení tlaku je nutné regulovat na únosnou mez. Zvýší-li se tlak až na hodnotu 16,1 MPa spustí se do činnosti hlavní sprchový systém, při neustálém zvyšování tlaku se na hodnotě 16,3 MPa spustí i rezervní sprcha. Dokud nedojde k poklesu tlaku zůstávají v činnosti obě sprchy, v opačném případě při poklesu tlaku se uzavře rezervní sprcha a pokračuje ve sprchování parního polštáře už jen hlavní sprcha. K uzavření hlavní sprchy dojde samočinně, když se tlak sníží na povolenou hodnotu tlaku 15,8 MPa.

6.3 Charakteristika ohřívacího systému

Elektroohříváče	1.	2.	3.	4.	5.	Jednotka
Zapínací tlak	15,7	15,6	15,5	15,4	15,2	MPa
Vypínací tlak	15,75	15,7	15,65	15,5	15,4	MPa
výkon	300	300	700	700	1050	kW
Celkový výkon	3050					kW



Se snížením tepelného výkonu reaktoru se sníží i teplota chladiva v primárním okruhu. Při tomto stavu dochází ke zmenšení objemu chladiva a snížení tlaku v celém okruhu. Toto snížení tlaku může být velmi nebezpečné, pokud bychom nadále nezasáhli a pokračovali ve snižování tlaku. Tlak by mohl dosáhnout tak nízkých hodnot, že by nastalo za daného tlaku a teploty k varu chladiva v primárním okruhu. Znamenalo by to neschopnost chladit reaktor a několika násobné zvětšení měrného objemu chladiva, což by mohlo mít za příčinu rozrušení těsnosti primárního okruhu. Při poklesu tlaku na hodnotu 15,7 MPa se samočinně zapne první řada elektroohříváčů, při neustálém poklesu se postupně připojují další řady tak, aby svým výkonem zajistili dostatečnou tvorbu parního polštáře. Vypínání maximálního výkonu se provádí při hodnotě tlaku 15,4 MPa a úplné vypnutí je nastaveno na optimální provozní hodnotě 15,75 MPa.

7. ZÁVĚR

V úvodu tato bakalářská práce poukazuje na jadernou energetiku jako na skutečnost, bez které se v budoucnu neobejdeme. Pro mnohé z nás jaderná energetika ale nepředstavuje ideální zdroj energie, spíše vyvolává obavy a hrozbu. Projekt Mir 1200 je výsledkem evolučního vývoje technologie s tlakovodními reaktory a nabízí technickou vyspělost a spolehlivost bezpečnostních systémů u nichž byl kladen vysoký důraz na bezpečnost. Bakalářská práce obsahuje popis koncepce kompenzace objemu chladiva této jaderné elektrárny. Na základě vstupních parametrů byl proveden návrh výpočtu sprchového systému a ohřívacího systému, tak aby byl zaručen bezpečný chod ve všech přechodových režimech kompenzátoru objemu. Další část se zabývá náhradou vodorovných elektroohříváčů za svislé elektroohříváče. Toto řešení nám umožňuje především zmenšit vnější rozměry kompenzátoru a tím i usnadnit přepravu a umístění v kontejneru. U svislých elektroohříváčů dále byl proveden kontrolní výpočet pracovní teploty, vypočtená teplota je vyhovující, pohybuje se hluboce pod kritickou teplotou pro daný materiál elektroohříváče. V poslední části bakalářská práce obsahuje návrh charakteristik pojistného, sprchového a ohřívacího systému. Zapínání a vypínání je provedeno v závislosti na tlaku v kompenzátoru objemu. Charakteristika byla navržena s důrazem na bezpečnost provozu.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1. PROF.ING. JOSEF BEČVÁŘ a kolektiv – Jaderné elektrárny, Nakladatelství technické literatury, 1977.**
- 2. Radko Hejzlar – Stroje a zařízení jaderných elektráren díl 1 a 2., Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005.**
- 3. Oldřich Mátal – Jaderné reaktory a jejich chlazení, Nakladatelství CERN VUT v BRNĚ, 2001.**
- 4. František Hezoučský – Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory, Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005.**
- 5. Prof. Ing. František Dubšek, DrSc. – Jaderná energetika, PC – DIR spol. s.r.o. Nakladatelství Brno, 1994.**